

# 磁気立体回路素子の材質と磁束制御特性との関係

正員 岡 英 夫 (岩手大)  
 正員 山 田 弘 (岩手大)  
 正員 藤 原 民 也 (岩手大)

## Relation between Material and Flux Control Characteristic of Ferrite Orthogonal Core

Hideo Oka, Member, Hiroshi Yamada, Member, Tamiya Fujiwara, Member (Iwate University)

In this paper, the relationship between material and the flux control characteristic of a ferrite orthogonal core (FOC) as a measurement and control element, is presented.

Five types of materials are examined to know the difference between their flux control characteristics. Results show that the material which has higher amount of saturation flux density can make its flux control amount bigger.

It is clear that the higher rectangular factor material has the larger amount of flux control. Furthermore, the material which has low loss but high saturation flux density shows good linear flux control characteristic. FOC which has good rectangular factor and high flux sensitivity is useful for measurement control element, especially for the on-off activity.

キーワード：磁気立体回路素子，直交磁心，磁束制御，フェライト

### 1. ま え が き

フェライトで作製した直交磁心<sup>(1)~(4)</sup>である磁気立体回路素子<sup>(5)~(7)</sup>は、直交磁界で磁束制御することにより複数の磁路が生じ、著しい磁束の疎密を磁気立体回路素子内に生じることになる。しかし、このために磁気立体回路素子の各部の磁束、透磁率およびインダクタンスなどの値を変えることができるほか、脚部間の磁束差を利用できるなどの特徴を有するため、磁気立体回路素子を計測・制御素子として利用すると、磁束を媒体として信号検出と信号処理双方の機能を有する計測器を簡単な回路構成で製作することが可能となる<sup>(5)~(7)</sup>。

そこで、著者らは上述の特徴を生かした電流センサ<sup>(8)</sup>および直線、傾斜、回転などの変位センサ<sup>(8)(9)</sup>を考案・試作し、計測・制御素子としての基礎特性および動作機構<sup>(10)</sup>形状効果<sup>(6)</sup>を明らかにしてきた。

しかし、磁気立体回路素子の材質特性と磁束制御特性の制御性能についての報告はほとんどなされていない。

そこで、本研究では磁気立体回路素子の材質特性による磁束制御特性の差異を明らかにすべく、ここではフェライトが数多くの種類を有する特色ある材質であり材質特性を議論するには最適な材料と考えられる。また、このフェライトで論じたことは今後他の材料にも大いに有効と思われる。よって、5種類のフェライトを例にあげ、磁気立体回路素子の磁性材料の材質による磁束制御特性の差異と計測・制御素子として用いる観点より、磁束制御性能について明らかにする。

更に、これらの結果を踏まえて、電流を入力信号とする磁気立体回路素子の磁束制御法について、主として線形な制御特性<sup>(5)</sup>として利用する場合と、非線形な制御特性<sup>(14)</sup>として利用する場合とに分類し、その利用方法について検討を加えている。

## 2. 試料および測定回路

図1は磁気立体回路素子の形状と寸法を示している。この試料は最もスタンダードな磁気立体回路素子の形状の一例である。次に、ここで用いる各試料の材質名を示す。また各試料の名称を右記の略号で述べることにする。

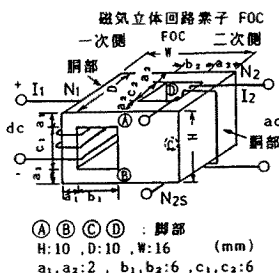
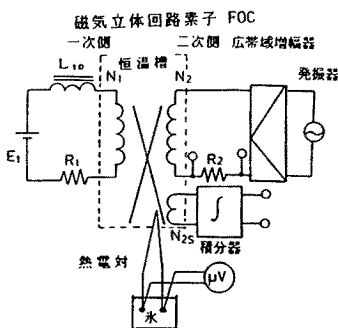


図1 磁気立体回路素子の形状寸法  
Fig. 1. Shape and size of FOC.

表1 各フェライト材料の材質標準特性

Table 1. Standard material characteristic of each Ferrite.

	$B_s$ (mT)	$H_c$ (A/m)	$\Gamma$	$T_c$ (°C)	$\mu_{max}$
Mn-Zn(L)	500	20	0.16	250	2,200
Mn-Zn(B)	490	9.3	0.20	180	4,600
Mn-Cu(T)	300	11	0.53	50	9,000
Ni-Zn(L)	250	16	0.24	100	3,600
Mn-Mg(R)	300	6.4	0.93	160	7,500



$L_{10}=500$  mH,  $N_1=20$ ,  $N_2=12$ ,  $N_{2s}=1$   
 $R_1=7 \Omega$ ,  $R_2=1.01 \Omega$

図2 交流磁化特性および磁束制御特性の測定回路

Fig. 2. Measuring circuit for AC magnetic characteristic and flux control characteristic.

- (i) 比較的飽和磁束密度の高い Mn-Zn 系フェライト: Mn-Zn(B)
- (ii) 低損失の Mn-Zn 系フェライト: Mn-Zn(L)
- (iii) インダクタ用の Ni-Zn 系フェライト: Ni-Zn(L)
- (iv) 角形ヒステリシス特性を有する Mn-Mg 系フェライト: Mn-Mg(R)
- (v) Mn-Cu 系感温フェライト (キュリー温度 50°C): Mn-Cu(T)

表1は上記の試料の主な材質標準特性<sup>(11)</sup>である。同図に示すように、各材料の飽和磁束密度  $B_s$ 、保磁力  $H_c$ 、角形比  $\Gamma$ 、キュリー温度  $T_c$ 、および最大透磁率  $\mu_{max}$  を示す。

図2は磁気立体回路素子の交流磁化特性および磁束制御特性の測定回路である。これらの測定は JIS 規格<sup>(12)</sup>を参考に行った。磁気立体回路素子を恒温槽に入れ、磁気立体回路素子の一次側励磁巻線  $N_1$  に直流電流を加え拘束磁化条件の下で励磁する。更に、二次側励磁巻線  $N_2$  に発振器出力を広帯域増幅器で増幅した電圧を印加し、磁束正弦波条件で励磁を行う。また、磁気立体回路素子の胴部に探りコイル  $N_{2s}$  を施し、各磁束を測定する。表面温度は、磁気立体回路素子の脚部に熱電対を接触させることによりマイクロボルトメータで求められる。測定手順は初めに一次側起磁力  $F_1$  の値を設定して交流磁化特性 ( $\phi_2$ - $F_2$  特性) を測定する。次に、二次側起磁力  $F_2$  を指定の値に設定し、磁束制御特性 ( $\phi_2$ - $F_1$  特性) を測定した。

## 3. 測定結果

〈3・1〉 交流磁化特性および磁束制御特性 図3は二次側起磁力  $F_2$  を 20 A、励磁周波数  $f_2$  が 1 kHz 一定として一次側起磁力  $F_1$  によって、磁束制御した場合の各試料の二次側  $\phi_2$ - $F_2$  特性の実測例である。これらを見ると、いずれの試料も一次側起磁力  $F_1$  によって二次側の交流磁化特性が磁束制御されていることがわかった。

図4(a)~(e)はそれぞれ Mn-Zn(L), Mn-Zn(B), Mn-Cu(T), Ni-Zn(L), Mn-Mg(R) で作成した磁気立体回路素子の一次側起磁力  $F_1$  により磁束制御を行った場合の交流磁化特性である。

図5は交流磁化特性の励磁振幅の説明図である。二次側起磁力  $F_2$  を小振幅、中振幅、大振幅と定め、磁束レベル設定による各振幅領域における二次側磁束  $\phi_2$  と二次側起磁力  $F_2$  の傾き  $\Delta\phi_2/\Delta F_2$  に着目する。この三つの振幅レベルを図4の結果に適用してみると磁束制御することにより小振幅領域が増し、中振幅領域

域が次第に右側に移動することがほとんどの試料で認められた。

図6は図5に示した中振幅領域の傾き  $\Delta\phi_2/\Delta F_2$  の最大値を図4の結果より求めたものである。同図に示すように、磁束制御によって傾き  $\Delta\phi_2/\Delta F_2$  の最大値は減少する傾向を示すことがわかる。この原因は、磁気立体回路素子の片側励磁の場合よりも両側励磁の場合

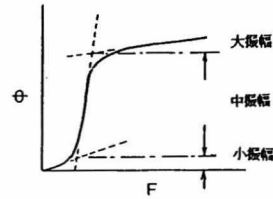


図5 交流磁性化特性の励磁振幅と傾きの説明図

Fig. 5. Explanatory figure of exciting amplitude and inclination in AC magnetizing characteristic.

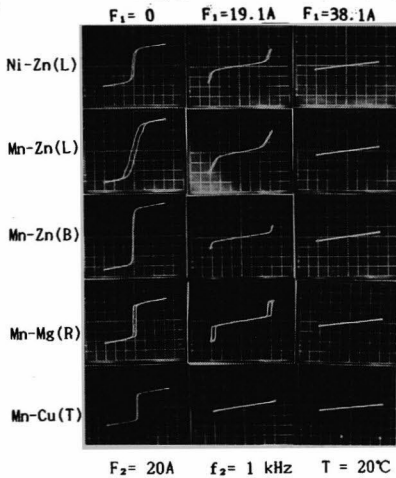


図3 磁束制御時の各試料の二次側  $\phi_2$ - $F_2$  特性  
Fig. 3. Secondary  $\phi_2$ - $F_2$  characteristic under flux control.

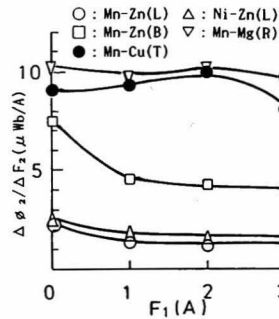
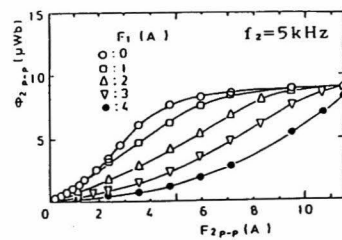
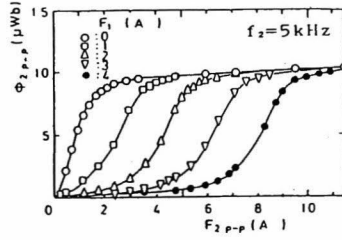


図6 各フェライトの中振幅領域の傾き  $\Delta\phi_2/\Delta F_2$

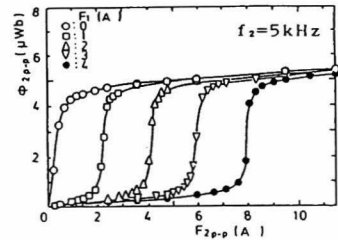
Fig. 6. Inclination of each ferrite  $\Delta\phi_2/\Delta F_2$ .



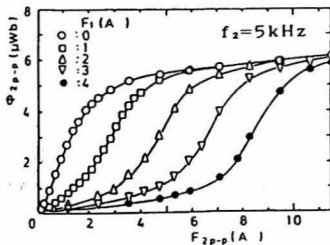
(a) Mn-Zn(L)



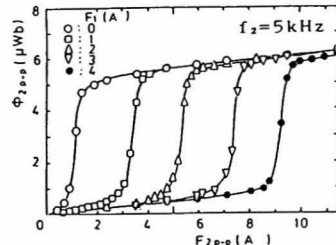
(b) Mn-Zn(B)



(c) Mn-Cu(T)



(d) Ni-Zn(L)



(e) Mn-Mg(R)

図4 一次側起磁力により磁束制御した場合の交流磁性特性  
Fig. 4. AC magnetic characteristic when flux is controlled by the primary magnetomotive force.

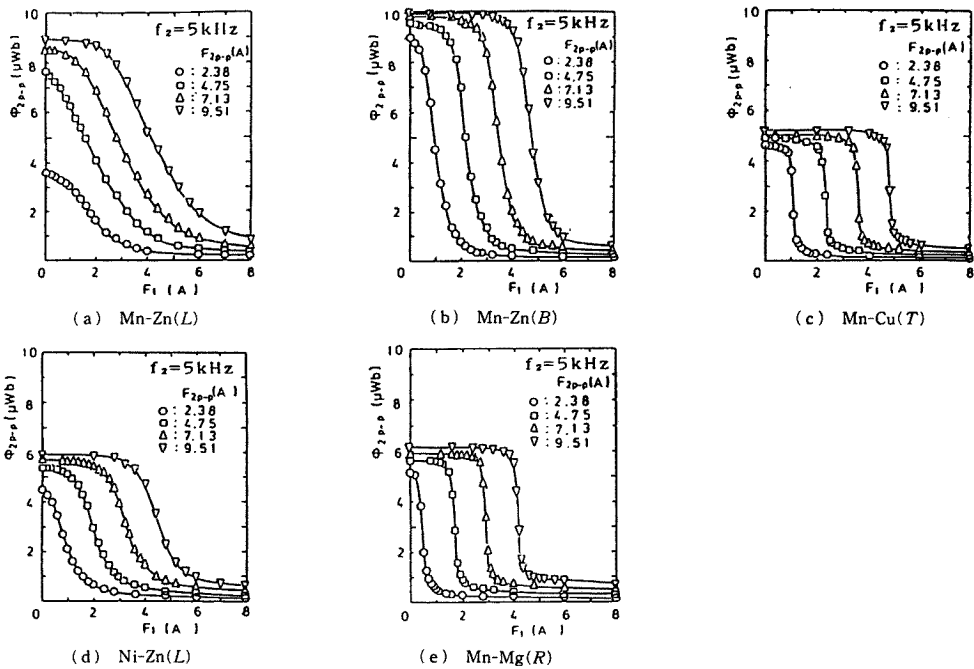


図 7 磁気立体回路素子の磁束制御特性  
Fig. 7. Flux control characteristic of FOC.

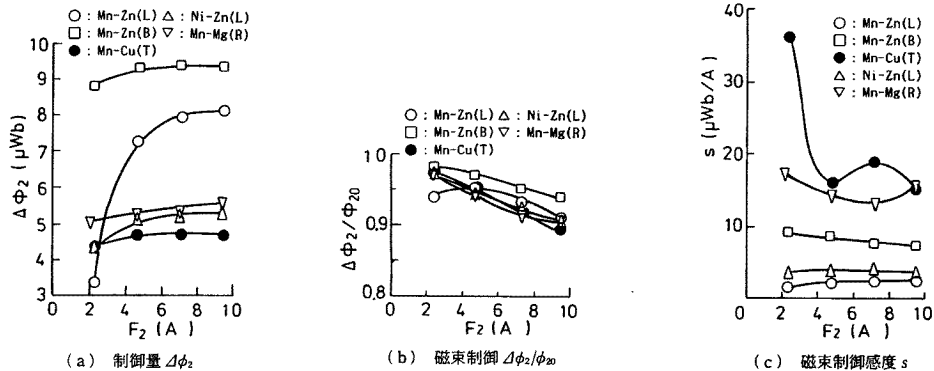


図 8 磁束制御特性の基本性能  
Fig. 8. Basic performance of flux control characteristic.

合が磁路長が長いことに起因すると考えられる。ただし、角形比  $\Gamma$  の良好な Mn-Mg(R) と Mn-Cu(T) はほとんど変化割合が少ないことがわかる。

更に、図 7 (a)~(e) は磁気立体回路素子の磁束制御特性を示している。同図より、最大透磁率  $\mu_{max}$  および角形比  $\Gamma$  の高い値を有する材質は、一次側起磁力  $F_1$  により二次側磁束  $\phi_2$  が急激に変化する領域を有する磁束制御特性を示すことが認められた。

図 8 (a)~(c) は、それぞれの試料について磁束制御の性能評価係数<sup>(10)(13)</sup>である磁束制御量  $\Delta\phi_2$ 、磁束

制御率  $\Delta\phi_2/\phi_{20}$ 、および磁束制御感度  $s$  の測定結果を示している ( $\phi_{20}$  : 一次側起磁力  $F_1$  が零の場合の二次側磁束  $\phi_2$  を呼ぶ)。

同図より、磁束制御量  $\Delta\phi_2$  は材質特性である飽和磁束密度  $B_s$  に対応するとも考えられる。更に (b) 図より、実験で用いた材質の磁気立体回路素子はすべて磁束制御率  $\Delta\phi_2/\phi_{20}$  が特性の 0.9 以上の値を示していることがわかる。この結果より、磁束制御率  $\Delta\phi_2/\phi_{20}$  は材質にはほとんど影響されないことが認められた。また、(c) 図より磁束制御感度  $s$  は材質特性の角形比

によるものと思われる。

図9は磁束制御特性の制御領域の説明図である。図示のように、磁気立回路素子の磁束制御特性はI, II, IIIの3領域に分けることができる。

図10(a), (b)は非線形特性あるいは線形特性として利用する場合の磁束制御特性に分類し、その利用法について検討する。(a)図はI領域とIII領域部分を利用する特性で、二次側磁束 $\phi_2$ と一次側起磁力 $F_1$

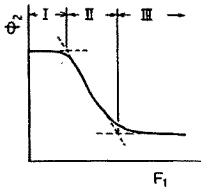
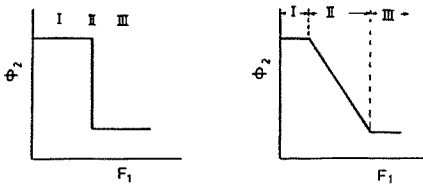


図9 磁束制御特性の制御領域

Fig. 9. Control range of flux control characteristic.



(a) I領域とIII領域を利用する場合 (b) II領域を利用する場合

図10 非線形および線形特性として利用する場合の磁束制御特性

Fig. 10. Corresponding figure of II region in flux control characteristic.

の関係が非線形な領域を主に利用する特性である。(b)図は主にII領域部分を利用する特性である。以上、2通りの磁束制御特性の利用方法に分類できるものと考えられる。(a)図に示す非線形な特性としてはオンオフ動作<sup>(14)</sup>を行う計測・制御素子として適していると考えられる。この場合、磁束制御率 $\Delta\phi_2/\phi_{20}$ 、感度 $s$ 、が高い値を示すことが望ましいと考えられる。これらの結果を踏まえ、図7, 図8の結果よりMn-Mg(R), Mn-Cu(T)などの角形比の高い値を有する材質の磁気立回路素子に対応するものと考えられる。

(b)図に示す $\phi_2$ と $F_1$ の関係が線形な特性としてII領域を応用することが望ましいとする計測・制御素子は $\phi_2$ と $F_1$ との関係が線形性に優れ、磁束制御量 $\Delta\phi_2$ 、磁束制御率 $\Delta\phi_2/\phi_{20}$ が高い値を示すことが望ましいものと考えられる。これらの考えに基づき図7, 図8の結果よりMn-Zn(L), Mn-Zn(B), Ni-Zn(L)などの飽和磁束密度の高い値を示す材料に対応することがわかる。

〈3・2〉周波数特性 ここでは、各材質の特性の違いによる二次側起磁力 $F_2$ を一定とした二次側磁束 $\phi_2$ の磁束制御特性を測定し、磁束制御による二次側磁束の周波数特性への影響について明らかにする。

図11(a)~(d)は各Mn-Zn(B), Mn-Cu(T), Ni-Zn(L), Mn-Mg(R)の磁束制御時の二次側磁束 $\phi_{2p-p}$ の周波数特性である。これらの結果は材質本来の特性の交流初透磁率 $\mu_{iAC}$ よりも低い値であり、また磁束制御によりほとんどの試料では磁束値が減少することを示していることが了解される。

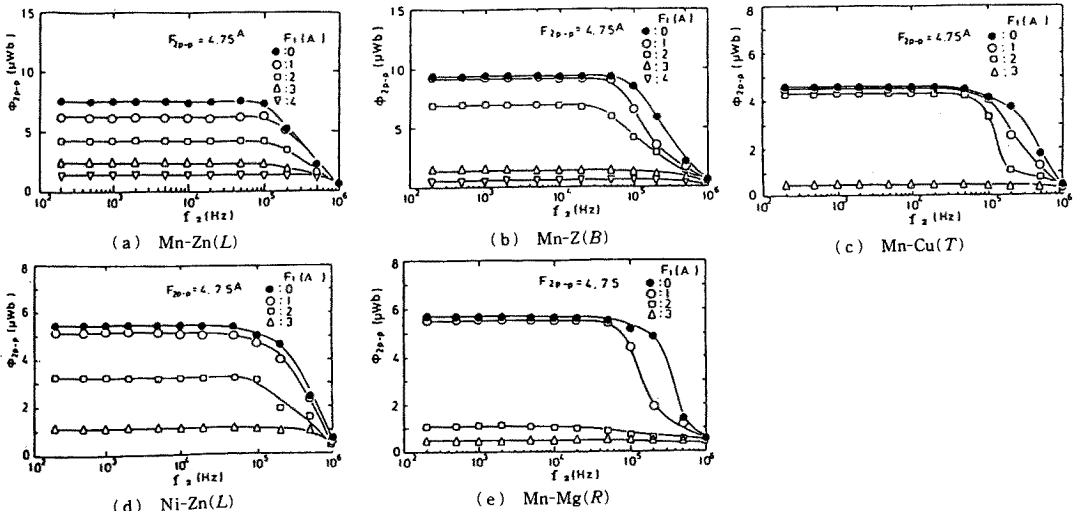


図11 二次側磁束の周波数特性

Fig. 11. Frequency characteristic of the secondary flux.

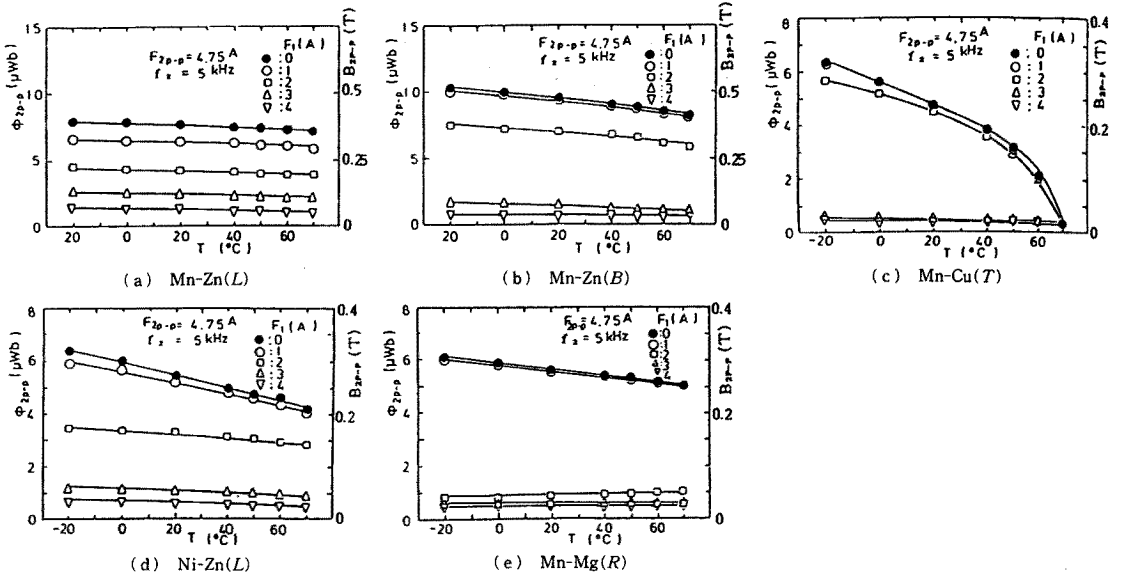


図 12 二次側磁束の温度特性  
 Fig. 12. Temperature characteristic of the secondary flux.

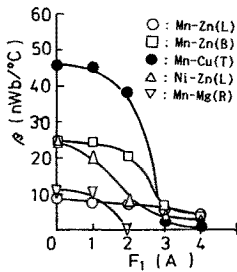


図 13 磁気立体回路素子の温度係数  
 Fig. 13. Temperature coefficient of FOC.

〈3・3〉 温度特性 計測に用いるための磁気立体回路素子では温度変化に対する磁気特性の安定性が重要な要素となる。そこで、ここでは磁気立体回路素子の二次側磁束の温度特性について明らかにする。

図 12 に磁束制御を行った場合の二次側磁束の温度特性を示す。(a)~(d)図はそれぞれ Mn-Zn(B), Mn-Cu(T), Ni-Zn(L), Mn-Mg(R)の二次側磁束の温度特性である。以上の結果より、温度が 1°C 変化した場合の二次側の二次側磁束の変化量を温度係数  $\Delta\Phi/\Delta T$ <sup>(13)</sup> として求めると、一次側起磁力  $F_1$  を印加した場合の温度係数は図 13 のように求められる。同図より、感温フェライトである Mn-Cu(T) は温度に対し顕著な磁束の変化を示すことが認められた。

また、各試料とも磁束制御により温度係数は小さく

なることが認められた。一方、本実験に用いた試料中最もキュリー温度が高い値を示している Mn-Zn(L) は、磁束制御による温度係数への影響が最も少ない値を示すことが了解される。

〈3・4〉 磁束波形のひずみ率特性 磁気素子を飽和領域まで励磁すると、一般に非線形特性のため磁束波形あるいは起磁力波形のどちらか、もしくは双方に波形ひずみが生じる。従って、励磁回路の条件は起磁力か磁束のどちらか一方の波形が正弦波となるように設定する必要がある。本研究の場合はフェライトの特徴を生かして、高周波領域での使用が考えられること、また、ほかの電子デバイスとの結合も考慮し、磁束正弦波条件に設定することにした。また、この条件がどの程度満足されているか、あるいは制御起磁力を加えることによる二次側磁束波形の変化がどのようになるかなどを知るために、その磁束波形のひずみ率<sup>(15)</sup> をスペクトラムアナライザを用いて測定することにした。

図 14(a) は Mn-Zn(L) の二次側磁束波形のひずみ率の測定結果である。また、(b)~(e) 図はそれぞれ Mn-Zn(B), Mn-Cu(T), Ni-Zn(L), Mn-Mg(R) の磁気立体回路素子の場合のひずみ率特性を示している。これらの結果より、一次側起磁力  $F_1$  を加えると、いったんひずみ率は減少するが、 $F_1$  を増大させていくとひずみ率が上昇し、極大値をとった後に再び減少することがわかる。次に、 $F_1=0$  でのひずみ率と

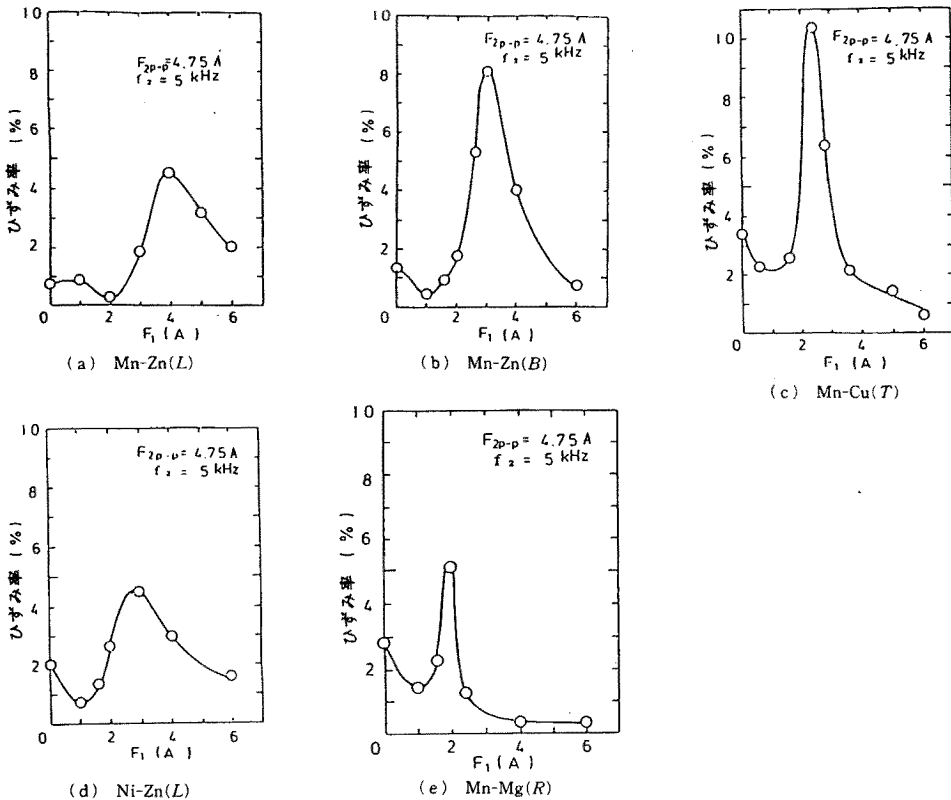


図 14 二次側磁束波形のひずみ率

Fig. 14. Distortion factor of the secondary flux wave.

表 2 一次側起磁力  $F_1=0$  におけるひずみ率とひずみ率の最大値

Table 2. Distortion factor and its maximum value of the secondary flux wave when the primary magnetomotive force is  $F_1=0$ .

	$F_1=0$ でのひずみ率(%)	ひずみ率の最大値(%)
Mn-Zn(L)	0.7	4.5
Mn-Zn(B)	1.33	8.12
Mn-Cu(T)	3.35	10.4
Ni-Zn(L)	2.05	4.65
Mn-Mg(R)	2.84	5.15

ひずみ率の最大値を材料ごとに書き表すと表2のようになる。このように磁束制御すると二次側磁束波形のひずみ率が大きくなることを示している。また、材質特性の最大透磁率  $\mu_{max}$  の値が高い試料はひずみ率が比較的高い値を示すことがわかった。

以上、各材質で作成された磁気立体回路素子に対する磁束制御特性と材質特性との関連性について簡単な評価を行った結果、制御時の交流磁化特性の中振幅領

域の傾き  $\Delta\phi_2/\Delta F_2$  の最大値はほぼ角形比に対応することが認められた。また、磁束制御特性については、磁束制御量  $\Delta\phi_2$ 、磁束制御率  $\Delta\phi_2/\phi_{20}$ 、磁束制御感度  $s$  について検討すると、磁束制御量  $\Delta\phi_2$  は材質特性の飽和磁束密度に対応し、磁束制御感度  $s$  は角形比に関係する。しかし、磁束制御率については、材質による影響がほとんど見られないことが了解された。

#### 4. むすび

以上、磁気立体回路素子の材質については比較的飽和磁束密度の高い Mn-Zn 系フェライト、低損失の Mn-Zn 系フェライト、低損失インダクタンス用 Ni-Zn 系フェライト、角形比に優れた Mn-Mg 系フェライト系 Mn-Cu 系感温フェライトなどの各種フェライトを例にして、磁気立体回路素子を構成し、それぞれの磁束制御特性を中心に次のことを明らかにした。

- (1) 飽和磁束密度が高い材質ほど磁束制御量を大きくできる。
- (2) 磁束制御率には材質特性の違いがほとんど現

れない。

(3) 磁束制御感度は角形比に大きく影響されるため、角形比の高いMn-Mg系フェライトおよびMn-Cu系感温フェライトで作製した磁気立体回路素子が高い値を示す。

(4) 低損失のMn-Zn系フェライトで作られた磁気立体回路素子の磁束制御特性の主な利用法は、線形な制御特性として用いることが望ましいと思われる。

(5) Mn-Mg系フェライトで作製した磁気立体回路素子は角形比が優れているため、磁気立体回路素子の磁束制御感度は高いものとなる。従って、この磁気立体回路素子の二次側の最大値と最小値の間でオンオフ動作を行う計測・制御素子<sup>(14)</sup>として用いることが適している。

(6) キュリー温度の高い材質で作製した磁気立体回路素子は、磁束制御による温度係数への影響が最も少ないことが明らかになった。

(7) 磁束波形のひずみ率は最大透磁率の高い材質で作製した磁気立体回路素子が比較的高い値を示すことがわかった。

今後、磁性材料の材質特性より磁気立体回路素子の交流磁化特性および磁束制御特性を簡単に導き出すことのできる磁気立体回路素子の最適設計法を確立すると共に、アモルファス材などメタル系の薄帯を積層して作製した磁気立体回路素子<sup>(16)</sup>および複合磁気立体回路素子<sup>(17)</sup>の材質特性を十分に生かせる構成方法、更には最適応用についても明らかにしていきたい。

最後に、日ごろ指導を賜る東北大学名誉教授(八戸工大副学長)村上孝一先生に深謝いたします。

(平成3年10月4日受付, 同4年3月4日再受付)

## 文 献

- (1) S. D. Wanlass, et al.: "The Paraformer; A new passive power conversion device", *Eng. Sci.*, p. 9 (1968)
- (2) W. Z. Fam & R. P. Verma: "Steady-State analysis of parametric frequency changers", *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-13, No. 4, 1070 (1977)
- (3) Z. H. Meiksin: "Comparison of orthogonal and parallel-flux variable inductors", *IEEE Trans. Industr. Applic.*, IA-10, No. 3, 417 (1974)
- (4) O. Ichinokura & K. Murakami: "Graphical circuit analysis of Two C-core type parametric power converter". *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-14, No. 5, 1002 (1978)
- (5) H. Oka & J. Iwata: "A New Frequency Modulator using Ferrite Orthogonal Core", *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-17, No. 1, 1174 (1981)
- (6) 岡: 「磁束成分による磁気立体回路素子の形状効果と磁束制御特性の性能評価」, 電学論D, 112, 387 (平4-4)
- (7) 岡: 「直交磁路を利用した磁気回路素子の歩みと現状」, 電気学会計測・マグネティックス合同研資, IM-87-13; MAG-87-38, 19 (昭52)
- (8) H. Oka: "New FM Tachotelemeter using Ferrite Orthogonal Core", *IEE Proc. Part A*, 131, No. 8, 601 (1984)
- (9) 岡・岩田: 「磁性流体による磁気立体回路素子の磁束制御特性」, 信学論(C), J69-C, 206 (昭61-2)
- (10) H. Oka & P. P. Biringier: "Control Characteristic Analysis of a Ferrite Orthogonal Core", *IEEE Trans. Magnetics*, 25, No. 5, 2888 (1990)
- (11) Tokin: Ferrite Pot Cores Data Book (1977) Tohoku Metal Industries, Ltd.
- (12) 日本工業規格: 「フェライト磁心の材質性能試験方法」, JIS C 2561-1981
- (13) 岡: 「磁気立体回路素子の磁束制御と計測への応用に関する研究」, 東北大学工学博士学位論文 工第984号 (昭63)
- (14) 岡・岩田: 「三値パルス出力型磁気立体回路素子の基本動作」, 信学論C, J70-C, 939 (昭62)
- (15) 日本工業規格: 「電子測定器用語」, JIS C 1002-1975
- (16) 岡・岩田: 「磁気立体回路素子の材質について」, 第8回日本応用磁気学会学術講演概要集, 15 pD-2 (昭59)
- (17) 岡・岩田: 「磁気立体回路素子の構成方法に関する基礎的検討」, 電気学会マグネティックス研資, MAG-83-94, 35 (昭58)



岡 英 夫 (正員)

昭和48年岩手大学大学院工学研究科修士課程修了。50年同大学工学部勤務。63年～平成元年カナダ・トロント大学電気工学科Postdoctoral Fellow。現在、岩手大学工学部助教授。工学博士(東北大学)。磁気立体回路素子、磁性流体応用デバイスおよび磁性流体の磁気計測法に関する研究に従事。IEEE Senior Member。



山 田 弘 (正員)

昭和54年北海道大学大学院工学研究科博士課程満了。同年岩手大学工学部勤務。59年～61年MIT客員研究員。現在、岩手大学工学部助教授。工学博士(北海道大学)。誘電体の高電界現象に関する研究に従事。日本物理学会会員。



藤 原 民 也 (正員)

昭和48年東北大学大学院工学研究科修士課程修了。50年岩手大学工学部勤務。62年～63年MIT客員研究員。現在、岩手大学工学部助教授。工学博士(東北大学)。電気光学効果を用いた電界計測および放電に関する研究に従事。応用物理学会会員。